

УДК 628.473

И. В. Сатин

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры*

## ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ АЭРОБНОГО КОМПОСТИРОВАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД

*Найдены оптимальные условия аэробного компостирования твердых бытовых отходов и осадков сточных вод. Выделены основные факторы, влияющие на процесс компостирования. Изучено факторное пространство методами планирования эксперимента. Полученные результаты лабораторных и опытно-промышленных исследований позволили разработать технологию совместного обезвреживания осадков сточных вод и биоразлагаемой фракции твердых бытовых отходов.*

*Ключевые слова:* ТБО, ОСВ, переработка, компостирование, планирование эксперимента

**Формулировка проблемы и анализ публикаций.** Процесс компостирования представляет собой сложное взаимодействие между органическими отходами, микроорганизмами, влагой и кислородом. Результаты исследований условий процесса биохимического аэробного компостирования органического комплекса смеси пищевой фракции ТБО и осадков сточных вод (ОСВ), а также анализ литературных и патентных данных свидетельствуют о том, что при создании оптимальных условий для развития мезофильной и термофильной микрофлоры можно обеспечить высокую скорость течения этого процесса [1-5]. Это сокращает длительность получения качественного компоста, повышает эффективность использования технологического оборудования.

**Взаимосвязь с практическими заданиями.** Работа выполнена в поддержку государственной темы К 3-06-01 «Повышение эффективности систем городского хозяйства» и региональной программы «Охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности Донецкой области до 2010 года».

**Целью** предложенной работы является поиск оптимальных условий аэробного компостирования.

Полнота исследования достигается решением следующих **задач**:

1) выделение факторов, воздействующих на процесс компостирования, а также определение параметра оптимизации;

2) поиск оптимальных условий процесса.

**Изложение основного материала.** Согласно теории исследований [6, 7-10], объект исследования находится под влиянием различных факторов. Совокупность этих факторов разделяется на группы в зависимости от характера и степени участия в процессе.

Классифицировать эти фактора по отличительному признаку можно на четыре основные группы. В общем случае объект характеризуют входные и выходные параметры, а также управляющие и возмущающие воздействия.

К входным факторам можно отнести параметры, значения которых могут быть исследованы, но возможность оперативного воздействия на них отсутствует. В данном случае это – фракционный состав исходного сырья ( $D_{0,01-0,05}$ ), химический состав, плотность ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>), структура биоценоза и другие параметры.

Управляющие воздействия – параметры, на которые можно оказать целенаправленное воздействие. К ним относятся количество подаваемого воздуха ( $Q$ , м<sup>3</sup>/сут), свободный объем внутри смеси ( $FV$ , %) оцениваем по плотности смеси, влажность ( $W$ , %, по массе), высота загрузки ( $h$ , м), пропорция основных компонентов. Управляющие и входные параметры не зависят от процесса, протекающего в объекте.

Возмущающие воздействия – это параметры, которые не поддаются корректирующему влиянию. К ним можно отнести непредсказуемые события, происходящие в процессе компостирования – точечные концентрации токсических веществ, мутации, метеорологические воздействия (обильные дожди, резкие похолодания). Интенсивность воздействия этих факторов носят случайный характер.

Выходные параметры (отклики) характеризуют результат воздействия входных факторов, управляющих и возмущающих воздействий. К ним можно отнести – температуру смеси ( $t$ , °C), водородный показатель ( $pH$ ), зольность ( $Z$ , %), влажность по массе ( $W$ , %, по массе). Перечисленные отклики носят информативный характер, и будут использоваться для внесения ограничений в ходе эксперимента. Так, температура смеси ( $t$ , °C) должна быть

ограничена минимальным значением в 55 °С в термофильной стадии компостирования  $t(7)$ . Для оперативного изучения процесса компостирования применяем базовый темп роста температуры  $T_{0-7}$ , который и является параметром оптимизации. В лабораторных исследованиях было доказано, что базовый темп роста температуры определяет дальнейшее компостирование и качество полученного компоста.

Одновременное изучение нескольких факторов с минимальным количеством проведенных опытов возможно только методами планирования эксперимента. Для достижения поставленной цели используем композиционную ротатбельную матрицу полного факторного эксперимента  $2^3$ .

Эксперименты проводились в теплый период года на хозяйственно-бытовых канализационных очистных сооружениях г. Горловки. Опираясь на опыт других авторов [1-5] и особенности физиологии микроорганизмов, был выбран период года с температурой выше +8 °С, протяженностью 182 дня.

Опытно-промышленная установка имеет прямоугольную форму в поперечном сечении и в плане. Рабочий габарит (внутренний размер в плане) 2×4 м. Стены выполнены из глиняного кирпича. К дну установки крепятся перфорированные пластиковые трубы Ø 50 мм с шаговым расстоянием между осями 400 мм. Максимальный полезный объем установки составляет 6 м<sup>3</sup>.

В установку загружается смесь пищевой фракции ТБО и 30% осадков сточных вод. Воздух в установку подается через перфорированные трубы снизу.

Опираясь на предыдущие эксперименты при построении плана приняли решение стабилизировать параметры факторов «расход воздуха,  $x_1$ » и «плотность смеси,  $x_2$ » на уровне, соответствующем найденным оптимумов в предыдущих исследованиях (табл. 1). Высоту загрузки увеличивали.

В процессе проведения эксперимента в пределах плана было принято решение найти область оптимума путем движения по градиенту (табл. 2). Стабилизировав факторы  $\tilde{x}_1$ ,  $\tilde{x}_2$  находим движением по градиенту максимальные значения  $T_{0-7}$  (опыт № 12 ОП1).

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни	Факторы		
	$\tilde{x}_1$ Уд. расход воздуха	$\tilde{x}_2$ Плотность смеси	$\tilde{x}_3$ Высота загрузки
Верхний	1,4	360	1,2
Нижний	1,0	300	0,6
Основной	1,2	330	0,9
Интервал	0,2	30	0,3

Подтверждена статистическая значимость коэффициентов регрессии интерполяционной формулы (табл. 2). С учетом отсеивания незначимых коэффициентов интерполяционная формула в кодированных переменных имеет вид:

$$T_{0-7} = 1,724 + 0,132x_3 - 0,1x_2 - 0,094x_1 + 0,053x_{23}, \quad (1)$$

В данном случае максимальное значение отклика достигается на уровнях плана  $x_1(-1)$  и  $x_2(+1)$ . В более обобщенном представлении факторного пространства графически наблюдается необходимость дальнейшего увеличения значений фактора  $x_3$  (рис. 1). На рисунке 1 также отчетливо видно, что увеличение фактора  $x_3$  со значений 0,6 до 1,2 м, при прочих равных условиях, приводит к большому увеличению отклика  $T_{0-7}$ .

Таблица 2. Матрица планирования и результаты эксперимента

№ опыта	Кодированные факторы				Натуральные факторы			Отклики $T_{0-7}$
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$\tilde{x}_3$	
1	+	-	-	-	1	300	0,6	1,62
2	+	+	-	-	1,4	300	0,6	1,47
3	+	-	+	-	1	360	0,6	1,73
4	+	+	+	-	1,4	360	0,6	1,55
5	+	-	-	+	1	300	1,2	1,76
6	+	+	-	+	1,4	300	1,2	1,65
7	+	-	+	+	1	360	1,2	2,17
8	+	+	+	+	1,4	360	1,2	1,85

Оценки коэффициентов регрессии:  $b_0=1,724$ ;  $b_1=-0,094$ ;  $b_2=-0,100$ ;  $b_3=0,132$ ;  $b_{23}=0,053$ .  
 Ошибка коэффициентов регрессии  $\Delta b_j = \pm 0,044$   
 (при  $t(16,0.05)=1,746$ );  $s^2_{(b_j)} = 0,00063$ .  
 Незначимые коэффициенты:  $b_{12}=0,040$ ;  $b_{13}=-0,033$ ;  $b_{23}=-0,023$ ;  $b_{123}=0,009$ .  
 Результаты опытов проведены с одинаковой точностью.

Движение по градиенту

№ опыта	Кодированные факторы				Натуральные факторы			Отклики $t(7)$
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$\tilde{x}_3$	
Расчетный шаг $b_j \times I_j$					0,02	3	0,04	
9					1,0	360	1,00	48,36
10					1,0	360	1,10	51,03
11					1,0	360	1,20	52,49
12					1,0	360	1,30	57,42
13					1,0	360	1,40	56,12

Таким образом, изучив положение отклика в области эксперимента, приняв во внимания предыдущий опыт, принимаем решение о движении по градиенту. Движение по градиенту дает максимальное значение отклика в опыте № 12 (см. табл. 2).

Полученное сочетание значений факторов можно считать оптимальным.

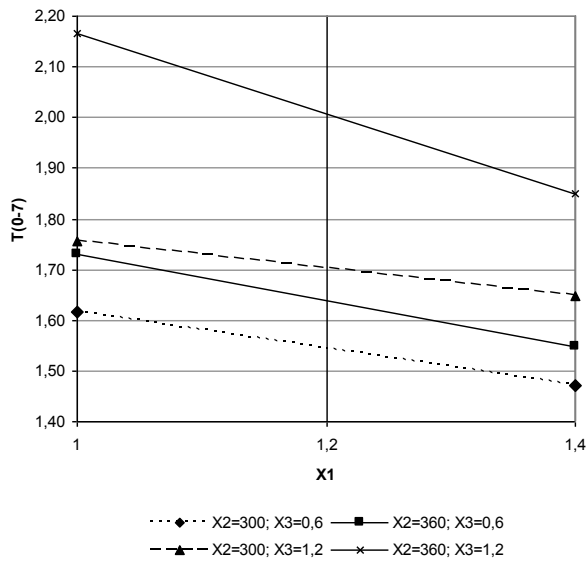


Рис. 1 Изменение базового темпа роста  $T_{0-7}$  температуры при различных уровнях плана

По результатам опытно-промышленных исследований получим уравнение множественной регрессии в натуральных переменных методом Брандона в виде зависимости,  $r = 0,96$ :

$$t_{(0-7)} = 0,039 \cdot \tilde{x}_2^{-0,334} \cdot \tilde{x}_1^{0,668} \cdot \tilde{x}_3^{0,227}, \quad (3)$$

Полученный компост из загрузок № 7 и 12 соответствует установленным требованиям по агрохимическим и санитарно-гигиеническим показателям. Также не выявлено фитотоксичности. Поэтому компост из загрузок 7 и 12 может быть использован в качестве удобрения для рекультивации карьеров, терриконов, газонов, цветников. Ограничением является его использование в сельском хозяйстве.

#### Выводы:

1) изучены закономерности и особенности аэробного компостирования по управляемым факторам и определены оптимальные параметры процесса: плотность смеси  $\rho = 360 \text{ кг/м}^3$ , высота загрузки  $h = 1,3 \text{ м}$ , удельный расход воздуха  $q = 1,0 \text{ м/(сут·кг)}$ ;

2) разработана математическая модель на основании опытных данных методом Брандона, позволяющая определить количественную взаимосвязь между факторами и параметрами оптимизации в пределах плана эксперимента.

#### Литература:

1. Дрейер, А. А. Твердые промышленные и бытовые отходы, их свойства и переработка [Текст] / Дрейер А. А., Сачков А. Н., Никольский К. С. – М. : «Экология города», 1997. – 230 с.
2. Гуляев, Н. Ф. Расчеты аэрационного, влажностного и теплового режимов при ускоренном механизированном обезвреживании во вращающихся емкостях [Текст] //

Санитарная очистка городов / Н. труды АКХ. – ОНТИ АКХ, 1964. – Вып. 25. – С. 19-34.

3. Афанасьев, В. Н. Критическая влажность компостируемых отходов животноводства и птицеводства [Текст] // Вестник сельскохозяйственной науки / Афанасьев В. Н., Миллер В. В., - 1987, №5. – С. 129-133.
4. Tiguia, S. M. Composting of spend pig litter in turner and forced-aerated piles [Текст] // Environmental Pollution 99 (1998) / Tiguia S. M., Tam N. F. Y. – P. 329-337.
5. Шевчук, В. Я. Биотехнология получения органоминеральных удобрений из вторичного сырья [Текст] / Шевчук В. Я., Чеботько К. А., Разгуляев В. Н. – К. : «Феникс», - 2001. – 236 с.
6. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии [Текст]. Изд. 3-е, пер. и доп./ Кафаров, В. В. – М. : «Химия», - 1976. – 464 с.
7. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. – М. : Наука, 1976. – 289 с.
8. Волчатова, И. В. Применение углеродсодержащих твердых отходов в качестве нетрадиционных удобрений [Текст] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2001. – Т. 9. – №. 533-540. – С. 533-536.
9. Полетаева, Т. Н. Утилизация осадков сточных вод малых очистных сооружений [Текст] // Коммунальное хозяйство городов. – 2013. – №. 72. – С. 151-155.
10. Лобачева, Г. К. Состояние вопроса об отходах и современных способах их переработки [Текст] // Волгоград: ВолГУ, Волг. Отд-ие экол. Академии. – 2005.

**Рецензент:** д-р.техн.н. проф. А.Я. Найманов, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Макеевка

**Автор:** САТИН Игорь Валентинович

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Макеевка, кандидат технических наук, доцент

#### SEARCH OPTIMAL CONDITIONS AEROBIC COMPOSTING OF OF SEWAGE SLUDGE

I. Satin

The optimum terms of the aerobic composting of hard domestic wastes and precipitations of sewages are found. Basic factors influencing on the process of punching are selected. Factor space by the methods of planning of experiment is studied.

**Keywords:** municipal waste, sewage sludge, recycling, composting, design of experiments

#### ПОШУК ОПТИМАЛЬНИХ УМОВ АЕРОБНОГО КОМПОСТУВАННЯ ОСАДІВ СТИЧНИХ ВОД

I. B. Satin

Знайдені оптимальні умови аеробного компостування твердих побутових відходів і осадів стічних вод. Виділені основні фактори, що впливають на процес компостування. Вивчено простір факторів методами планування експерименту. Отримані результати лабораторних та дослідно-промислових досліджень дозволили розробити технологію спільного знешкодження осадів стічних вод і біорозпадної фракції твердих побутових відходів.

**Ключові слова:** ТПВ, ОСВ, переробка, компостування, планування експерименту.